

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СМАЗЫВАНИЯ

© 2011 П. И. Маленко

Тульский государственный университет, пр-т Ленина 92, 300600 Тула, Россия

Поступила в редакцию: 20.09.2010 г.

Аннотация. В статье с использованием метода акустической эмиссии проведено исследование поверхностей трения в условиях ресурсного смазывания в различных режимах, приведена оценка адгезионных свойств и даны рекомендации по диагностике состояния трущихся поверхностей.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, ресурсное смазывание, поверхность трения, диагностика состояния зоны трения.

ВВЕДЕНИЕ

Для многих механизмов применяется ресурсное смазывание, то есть одноразовое смазывание на ресурс узла перед началом работы. Вследствие воздействия жестких режимов эксплуатации происходит трансформация видов трения со смазочным материалом: от трения с гидродинамической смазкой до трения с граничной смазкой. Наибольший практический интерес при этом представляет трение с граничной смазкой, так как именно при наличии данного вида трения при работе механизмов возникает опасность проявления адгезионных явлений, ведущих далее к схватыванию и заеданию, то есть к возникновению аварийных ситуаций.

Опасность проявления адгезионных свойств трущихся материалов особенно высока при превалировании процессов изнашивания смазочного материала в виде тонких защитных пленок на микроконтактах (вследствие механо-химических и других процессов) над его восстановлением (адсорбцией, диффузией и другими).

Первоначально исследования в данном направлении носили в основном качественный характер. Так, в работе [1] отмечается, что в условиях трения в результате трансформации смазочного материала на поверхности трения возникает состояние, «...когда в части точек контакта имеет место пленка сухая, в других жидкостная, идут механофизические процессы». Более детальный анализ показал, что при повышении температуры и переходе к трению с граничной смазкой на трущихся

поверхностях идут процессы физической и химической адсорбции с параллельным изменением коэффициента трения [2]. При этом большинство исследователей подчеркивают, что для трения со смазкой характерным является проявление процесса схватывания. В работе [3], опираясь на исследования А.С. Ахматова [4], указывается, что процесс схватывания носит трехстадийный характер: от разрыва изнутри смазочного материала через образование ювенильных (чистых) поверхностей до собственно схватывания. Каждой из стадий соответствует определенная температура. Определенный интерес представляет работа [5]. В данной работе подвергаются критике существующие теории процесса схватывания (действие пластической деформации, приводящей к рекристаллизации при пониженных температурах; диффузии с образованием мостиков сварки; соотношение твердости окислов и металлов и другие) и предлагается энергетическая теория. Сущность предлагаемой теории заключается в том, что при некоторых критических значениях поглощаемая энергия трения переходит в тепловую в области образования круговых термококов. Последние образуются на контактирующих микровыступах и вызывают появление мгновенных высокотемпературных вспышек. В результате увеличивается подвижность части твердого тела и образуется процесс обратимости поверхностной энергии, что приводит к схватыванию.

Более обоснованными представляются исследования, связанные с анализом адгезионных явле-

ний при трении, которые ассоциируются со схватыванием. К примеру, Д. Бакли установил, что различные грани кристаллической решетки имеют неодинаковую предрасположенность к адгезии, что, в конечном счете, приводит к неоднородности адгезионных проявлений на контакте [6]. В этом плане уместно отметить, что до недавнего времени отсутствовало четкое определение адгезии, так как была не выявлена ее физическая сущность. Понятие «адгезия» очевидно, появилось после известных опытов И.В. Обреимова по расщеплению слоев слюды. В дальнейшем предпринимались различные попытки объяснить данное явление. Однако силы молекулярного взаимодействия Ван-дер-Ваальса были на порядок и более меньше установленных опытным путем сил адгезии. Силы же ионного взаимодействия, во-первых, значительно превосходили адгезионные и, во-вторых, они имеют место при взаимодействии щелочных металлов.

Некоторую ясность в данном вопросе внесли результаты исследований, приведенные в статье [7]. Предложенная модель адгезионного взаимодействия металлов основана на использовании представлений о коллективных возбуждениях электрон-ионной системы — плазмонах. В результате получены значения энергии адгезии и сил адгезионного взаимодействия простых металлов (Fe-Cu, Fe-Cr и других) при достаточно больших величинах зазоров h между контактирующими телами вплоть до $h \leq 1$ мкм. Значения расчетных адгезионных сил коррелируют с аналогичными значениями, полученными экспериментально.

Вместе с тем необходимо отметить, что в реальных условиях обычно контактируют легированные металлы. В результате действия температур трения на поверхностях контакта образуются вторичные структуры различного фазового состава. Следовательно, для оценки сил адгезии и условий возникновения схватывания необходимо привлечение исследований, относящихся к физике металлов и металловедению. Подобные исследования проводились в течение последних 30 ... 40 лет. Прежде всего, следует обратить внимание на работы [8—10], в которых рассматриваются вопросы диффузии при пластическом деформировании поверхностных слоев при трении. На основании анализа большого количества экспериментальных данных установлено, что диффузионный процесс из приповерхностных слоев направлен к поверхности трения с образованием вторичных структур типа «мартенсита трения». Помимо этого доказано, что фазовые превращения во вторичных структурах

происходят при пониженных по сравнению с классическим металловедением температурах со смещением линий фазовых переходов. Что же касается трения со смазкой, то отмечается резкое повышение коэффициентов трения $f_{тр}$ вплоть до значений $f_{тр} = 6$. Несомненно, это свидетельствует о наличии схватывания.

При анализе коэффициентов трения на поверхности, имеющую сложную морфологию, возникают затруднения, связанные с пульсирующим, нестационарным характером энергии, выделяемой в зоне фрикционных контактов. Акустическая эмиссия, как показывают исследования, позволяет регистрировать отмеченные особенности. Существующие методы акустической диагностики позволяют определить только момент выработки смазочного материала и потери смазывающей способности по скачкообразному изменению акустического сигнала [11, 12]. Полученные таким образом результаты не дают возможности осуществлять диагностику переходного этапа от трения в режиме граничной смазки к трению без смазочного материала, для которого характерны активизация адгезионных свойств материала, локальные схватывание и «кратерные» когезионные вырывы. Метод акустической диагностики позволяет регистрировать отмеченные особенности процесса трения со смазкой.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Модель диагностики основывается на выборе информативных источников акустических колебаний и определении количественной взаимосвязи между процессами, происходящими в поверхностных слоях материала, и сопутствующими им акустическими сигналами. В качестве источника акустических сигналов принимается тангенциальный удар микронеровностей со скольжением на контактирующих поверхностях, вызывающий в материале упругие деформации. Феноменологическая модель единичного источника акустической эмиссии (АЭ) представлена на рис. 1.

Два микровыступа сферической формы радиусом r , находящиеся под нагрузкой N и имеющих относительную скорость v , вступают в контакт. В результате тангенциального удара в микровыступах возникают упругие деформации ϵ , скорость которых $\dot{\epsilon}$ пропорциональна v и обратно пропорциональна радиусу r . Расчеты показывают, что скорости деформации $\dot{\epsilon}$ достаточно велики и находятся в пределах $\dot{\epsilon} = (10^2 \dots 10^4)$ [1/с], что соответствует удару.

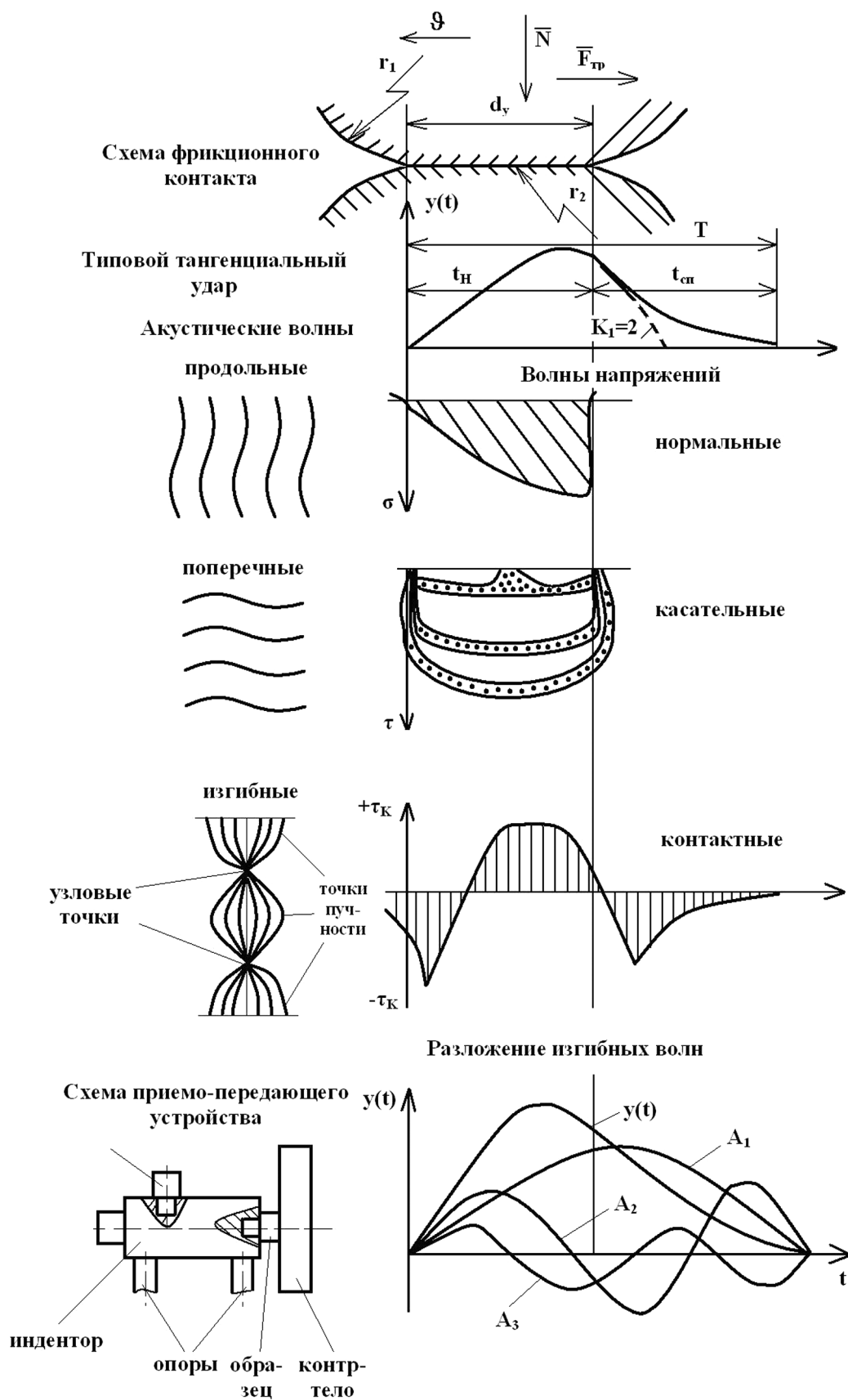


Рис. 1. Феноменологическая модель единичного источника АЭ

Таблица 1. Усредненные значения параметров геометрии поверхности трения

Класс шероховатости	Параметр шероховатости $R_a \cdot 10^6$, м	γ	$d_y^{\text{ср.кв.}} \cdot 10^{-6}$, м
6	2,5—1,25	0,104	69
7	1,25—0,63	0,110	55
8	0,63—0,32	0,115	43
9	0,32—0,16	0,117	33
10	0,16—0,08	0,120	27

В материале микровыступов возникают напряжения (нормальные, касательные и контактные). Возникшим волнам напряжений соответствуют акустические волны (продольные, поперечные и изгибные), имеющие различные диапазоны частот. Для регистрации акустических сигналов в приемной аппаратуре необходимо совпадение частотных диапазонов. В аппаратуре частотный диапазон находится в пределах $f = (0,2 \dots 51,2)$ кГц, которому соответствуют поверхностные волны, несущая частота которых может быть определена из зависимости [13]:

$$f_{\text{изг}} = \sqrt{\frac{0,792}{T_\phi}} \cdot \frac{d_{\text{пр}}}{l^2} \cdot C, \quad (1)$$

где $T_\phi = 1,08$ — коэффициент формы, $d_{\text{пр}} = 0,012$ м — приведенный диаметр ступенчатого индентора, $l = 0,11$ м — длина индентора, $C = 5 \cdot 10^7$ м/с — скорость распространения продольных упругих колебаний в металле.

В результате вычислений получается частота несущих изгибных колебаний $f_{\text{изг}} = 4,25$ кГц.

Для фиксации максимального акустического сигнала пьезодатчик необходимо расположить в место нахождения точки пучности изгибных волн. Поверхностные волны при прохождении через индентор раскладываются на составляющие. Пьезодатчик настроен таким образом, чтобы улавливать частоту с амплитудой A_2 .

Что же касается непосредственно предложенной модели, то считается, что структурная перестройка активного слоя контактной поверхности учитывается посредством коэффициента трения $f_{\text{тр}}$.

Выходным параметром модели является акустический амплитудно-частотный спектр $S_A(f)$. В связи с тем, что при трении имеет место множественный контакт микронеровностей, спектральная функция $S_A(f)$ может быть определена из соотношения:

$$S_A(f) = H(f) \cdot S_{d_y}(f), \quad (2)$$

где $S_{d_y}(f)$ — спектральное разложение элементарных длин контакта d_y , $H(f)$ — частотная характеристика акустического канала.

Функция $S_{d_y}(f)$ представляет собой спектральное разложение элементарных длин d_y площадок контактов микронеровностей по частотам и определяется измерением значений d_y на профилограммах реальных поверхностей трения по параллельной средней линии профиля прямой. Положение последней на профилограмме находится отсчетом от максимальной вершины профиля вниз на величину сближения контактирующих поверхностей [14]:

$$h = K(0.1 \cdot N)^{\gamma} R_{\text{max}}. \quad (3)$$

Значения коэффициента K зависят от приложенной нагрузки N и при ее изменении в пределах 10Н ... 1000 Н составляют $K = 0,33 \dots 0,55$. Показатели степени γ определяются классом шероховатости поверхности (табл. 1).

Методика вычисления функции $S_{d_y}(f)$ иллюстрируется рис. 2. Микропрофиль поверхности по параметру d_y представляется в виде некоторой стержневой модели. По оси ординат откладываются значения d_y , снятые из профилограмм в порядке их следования, а по оси абсцисс соответствующие им временные отрезки $\left(\frac{K_1}{\vartheta}\right) d_y$. При этом отношение

числа $\left(\frac{K_1}{\vartheta}\right) \approx 3$ и определяется упругим восстановлением деформированного в результате удара тела в тангенциальном направлении [15]. В результате выстраивается ряд отстоящих друг от друга на расстояниях $\tau_i = \frac{d_i}{\vartheta}$ прямоугольников. При соединении середин прямоугольников ломаной линией получается искомая случайная функция $d_y(t)$.

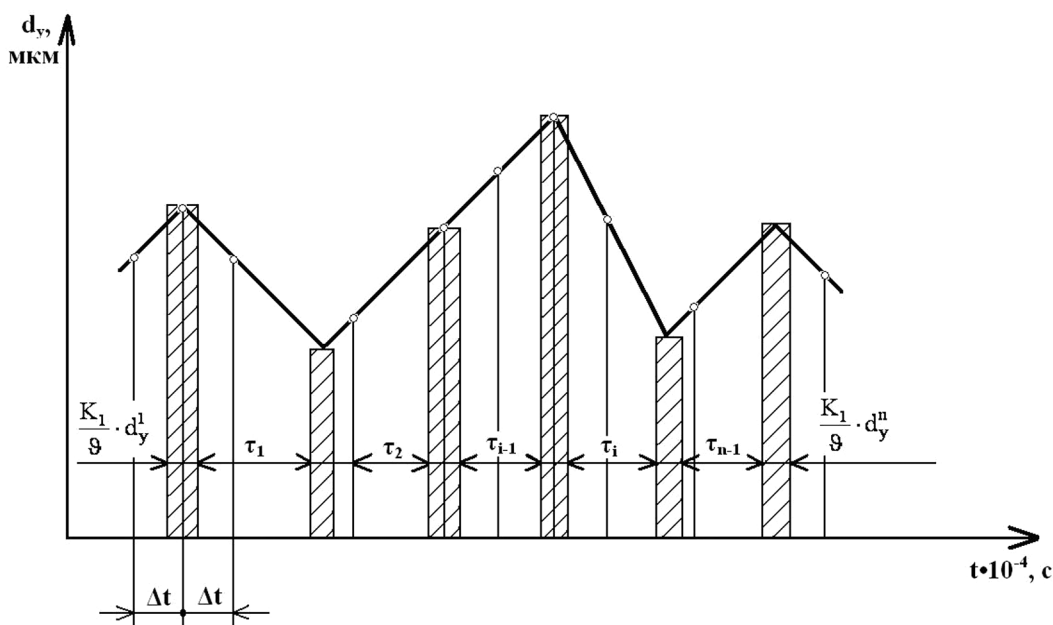


Рис. 2. Стержневая модель микропрофиля

Далее дискретным преобразованием Фурье функции $d_y(t)$, осуществляемым известными стандартными приемами [16], определяется нормированная корреляционная функция:

$$\rho_{d_y}(\tau) = e^{-\alpha\tau} \cdot \cos \beta\tau. \quad (4)$$

Коэффициенты α и β в уравнении (4) вычисляются по статистическим данным с применением метода наименьших квадратов.

Исходная спектральная функция $S_{d_y}(f)$ находится интегральным преобразованием Фурье выражения (4) и представлена в следующем виде:

$$S_{d_y}(f) = 2 \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + (2\pi f + \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (2\pi f - \beta)^2} \right]. \quad (5)$$

Частотная характеристика акустического канала $H(f)$ с учетом измерения акустических сигналов при проведении экспериментов датчиком ускорений выражается зависимостью:

$$H(f) = A^2 \cdot f. \quad (6)$$

Амплитуда A определяется исходя из уравнения, связывающего акустическую E_a и механическую E_M энергии при ударе [17]:

$$E_a = \frac{E_M \vartheta}{50 \text{ с}}, \quad (7)$$

где ϑ — скорость скольжения, c — скорость распространения звука в металле.

Механическая энергия E_M приравнивается работе силы трения на единичной контактной площадке d_y , вызывающей контактные деформации:

$$E_M = N^{(1)} f_{\text{тр}}^{(1)} d_y. \quad (8)$$

В свою очередь, из равенства нормальных давлений на всей площади фактического контакта и на отдельной контактной площадке $\sigma_{\text{cp}} = \sigma^{(1)}$ и, принимая с целью упрощения расчетов во внимание, что все n элементарных площадок контакта равны между собой, имеем:

$$E_M = \frac{1}{n} N (N f_{\text{тр}}^{(1)} d_y). \quad (9)$$

С другой стороны согласно [18]:

$$E_a = 2\pi^2 \rho \frac{f^2}{c^2} A^2, \quad (10)$$

где ρ — плотность металла.

В результате подстановки в выражения (7) и (9) значений постоянных величин и проведения соответствующих преобразований получим:

$$A = \frac{4,45}{nf} \sqrt{N \vartheta f_{\text{тр}}^{(1)} d_y}. \quad (11)$$

С учетом уравнений (2), (6) и (11) окончательно имеем следующую зависимость для определения спектральной плотности:

$$S_A(f) = \frac{4,45}{n} \cdot f \cdot S_{d_y}(f) \sqrt{N \vartheta f_{\text{тр}}^{(1)} d_y}. \quad (12)$$

Функция (12) представляет собой гладкую кривую (рис. 3), отражающую одновременность контактирования n микровыступов. В действительности вероятность такого события равна нулю и в

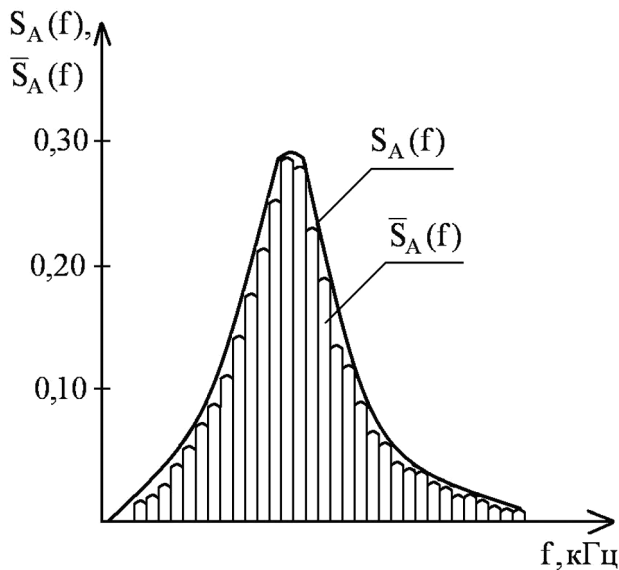


Рис. 3. Спектральная акустоэмиссионная модель $S_A(f)$ и спектральная плотность импульсной последовательности $\bar{S}_A(f)$

таким случае речь следует вести об импульсных последовательностях, вызванных смещением ударных импульсов по времени. Известно, что спектральная плотность импульсной последовательности имеет характерный гребенчатый вид (рис. 3) и определяется выражением [18]:

$$\bar{S}_A(f) = S_A(f) \frac{\sin \pi f K_i T_i}{\sin \pi f T_i}, \quad (13)$$

где функция $S_A(f)$ является огибающей.

Параметры K_i и T_i представляют собой случайные величины и характеризуют общее количество и ширину зубцов, а коэффициент трения $f_{тр}^{(1)}$ — ординаты пиков зубцов. Однако количественно оценить указанные особенности уравнения (13) можно только экспериментально.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по определению акустических спектров проводились на машине трения. В результате проведенных экспериментов были получены амплитудно-частотные спектры в координатах “ $g-f$ ” для различных сочетаний σ_k и ϑ . Для оценки кинетики изменений процессов на фрикционных контактах для сочетаний σ_k и ϑ по определенной методике анализировалось 6—10 спектров, полученных для различных моментов времени трения. В результате были установлены критические временные точки и соответствующие им температуры начала активизации адгезионных свойств стали, схватывания и когезии [19].

Поясним методику проведенного анализа на примере спектра, приведенного на рис. 4.

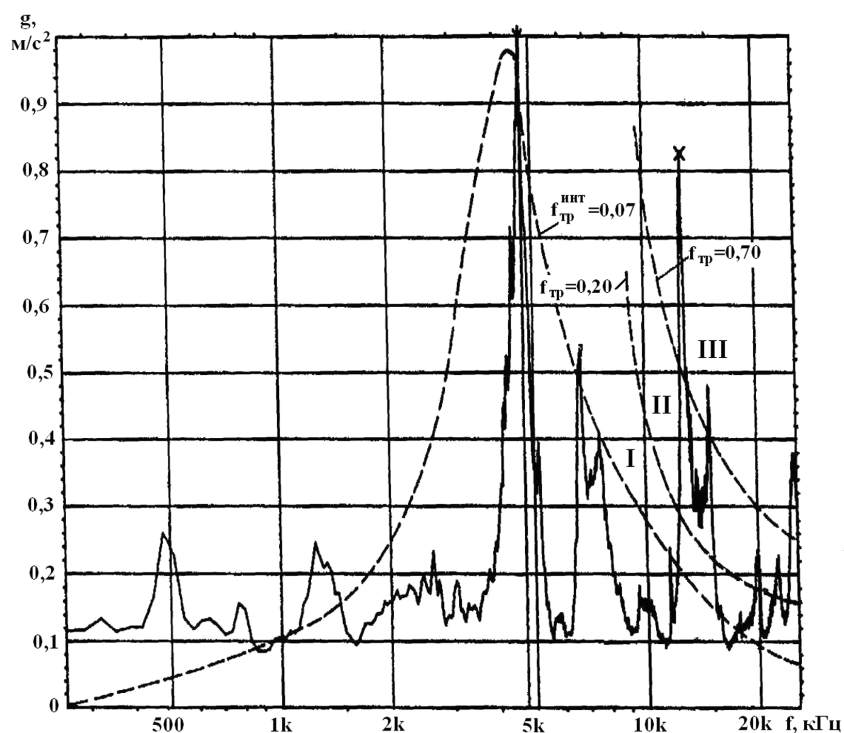


Рис. 4. Диагностика состояния зоны трения с помощью спектральных акустических разложений: I — зона граничного трения; II — зона смешанного трения; III — зона адгезионного схватывания ————— — экспериментальный график, - - - - - — расчетный график

Таблица 2. Определение областей видов трения

σ_k , МПа	ϑ , м/с	$(f_{тр}^{лок})_{max}$	$f_{тр}^{изм}$	Вид трения
1,5	1,5	0,20	0,025	Граничное
5,0	1,0	1,04	0,035	Схватывание
2,0	2,0	2,80	0,080	Схватывание с когезией
7,0	2,0	0,60	0,060	Смешанное
1,5	3,0	1,30	0,010	Схватывание
3,0	3,0	1,40	0,070	Схватывание
5,0	3,0	0,68	0,150	Смешанное
4,0	4,0	0,70	0,210	Смешанное
3,0	5,0	0,68	0,140	Смешанное

Спектр получен для внешних условий $\sigma_k = 3$ МПа ($N = 225$ Н), $\vartheta = 3$ м/с. Измеренный коэффициент трения $f_{тр}^{(изм)} = 0,07$ (табл. 2). Пилообразный характер экспериментального спектра отражает структурную морфологию поверхности трения, вызванную разнообразием процессов, идущих на контактных площадках. Для ее оценки наложим на экспериментальный спектр расчетный, выраженный уравнением (13). При этом в качестве $f_{тр}^{(1)}$ использовалось значение измеренного коэффициента трения, а в качестве d_y — среднеквадратическая длина контакта $d_y^{ср.кв.}$ (табл. 1). Общее количество площадок контакта устанавливалось на основании данных, приведенных в работе [11], исходя из номинальной площади контакта индентора установки $S_H = 1$ см² и площади фактического контакта $S_\phi = 0,03S_{ном}$ [14], откуда $n \approx 400$. Графически расчетный спектр представлен кривой 2 (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Сопоставление спектров позволяет сделать следующие выводы:

1) в области экстремума до частоты $f \leq 12$ кГц имеет место практически полное совпадение обеих спектров, что свидетельствует о корректности расчетного уравнения (11);

2) отмеченное совпадение спектров в низкочастотной зоне указывает на то, что измеренный коэффициент трения является в основном результатом контактирования больших по размерам контактных площадок, в то время как отклонения экспериментальных и расчетных значений $A_{ср.кв.}$ в

высокочастотной зоне позволяют оценить морфологию поверхности трения в данный момент;

3) количественную оценку отклонений целесообразно производить посредством использования специального понятия — «локальный коэффициент трения»:

$$f_{тр}^{лок} = \left[\frac{A_{ср.кв.}^{эксп.}}{A_{ср.кв.}^{расч.}} \right]^2 f_{тр}^{изм}. \quad (14)$$

При анализе значений $f_{тр}^{лок}$ ориентировались на следующие соотношения: при $(f_{тр}^{лок})_{max} \leq 0,2$ — имеет место граничное трение [14]; при $0,2 < (f_{тр}^{лок})_{max} \leq 0,7$ — имеет место сухое трение [14]; при $0,7 < (f_{тр}^{лок})_{max} \leq 1,4$ — происходит локальное схватывание [20]; при $(f_{тр}^{лок})_{max} > 1,4$ — наблюдаются когезионные вырывы с увеличением их «кратерных» размеров до критических величин [20]. Обобщенные результаты сравнения спектров приведены в табл. 2.

Таким образом, метод АЭ позволяет определить критические с точки зрения схватывания области режимов эксплуатации (ϑ и σ_k). В свою очередь появление вторичных структур изменяет фрикционные условия на контакте вплоть до появления схватывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпенёков Г. П. Физикохимия трения. Минск: Университетское, 1991. 396 с.
2. Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / К. М. Бадыштова и др. М.: Машиностроение, 1990. 411 с.

3. Буяновский И. А., Гурский Б. Э. // Трение и износ. 1998. Т. 19. № 2. С. 187—193.
4. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
5. Шамиур А. С., Ильющенко А. Ф. // Трение и износ. 1999. Т. 20. № 4. С. 364—370.
6. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986. 360 с.
7. Вакилов А. Н., Мамонова М. В., Прудников В. В. // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 6. С. 964—967.
8. Любарский И. М., Палатник Л. С. Металлофизика трения. М.: Металлургия, 1976. 176 с.
9. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
10. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. // МИТОМ. 1985. № 5. С. 16—23.
11. Свириденко А. И. и др. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. 280 с.
12. Сарычев Г. М., Щавелин В. М. // Физика и механика деформации и разрушения. 1981. Вып. 9. С. 89—92.
13. Глаговский Б. А., Московенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 208 с.
14. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбаров В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
15. Маленко П. И. Дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1998. 223 с.
16. Венцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 572 с.
17. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат. 1965. 448 с.
18. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
19. Власов В. М., Маленко П. И., Зеленко В. К. // Трение и износ. 1999. Т. 20, № 5. С. 489—495.
20. Мельниченко Н. В. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1990. 24 с.

Маленко Павел Игоревич — к.т.н., доцент, кафедра сварка, литье и технология конструкционных материалов, Тульский государственный университет; тел.: (4872) 331785, e-mail: malenko@tsu.tula.ru

Malenko Pavel I. — PhD (technical sciences), senior lecturer, chair of welding, moulding and technology of constructional materials, Tula State University; tel.: (4872) 331785, e-mail: malenko@tsu.tula.ru